干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治

张克存[1]， 安志山[1]， 何明珠[1]， 张凌云[2]， 王金国[3]， 侯永刚[4]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站，甘肃 兰州 730000；2. 宁夏交通运输厅，宁夏 银川 750001；3. 宁夏交投工程建设管理有限公司，宁夏 银川 750000；4. 宁夏公路勘察设计院有限责任公司，宁夏 银川 750000）

摘 要：乌玛高速公路是《国家公路网规划》中内蒙古乌海至青海玛沁高速公路的简称，对宁夏自治区沿黄经济带发展有着重要意义。通过野外观测和实地考察，对乌玛高速公路腾格里沙漠段风能环境、沙丘类型、地表沉积物进行分析。研究表明：观测期间年平均风速2.86 $m\cdot s^{-1}$，大于起沙风年均风速为6.23 $m\cdot s^{-1}$；起沙风以5~9 $m\cdot s^{-1}$为主，占比达96.36%；主导风向为NW-NNW和E-ESE。沿公路自NE向SW方向，输沙势和最大可能输沙量呈减小趋势。公路两侧沙丘以流动沙丘为主，沙丘类型包括格状沙丘和线性沙垄等。在风力作用下，格状沙丘主梁沿NE-SW延伸，沙丘高度自NE向SW方向呈增高趋势。公路沿线沙丘表层沉积物以中沙和细沙为主，分选性较好，偏度为正偏或极正偏，中等和宽峰态分布。

关 键 词：起沙风；输沙势；格状沙丘；乌玛高速公路

文章编号：

乌玛高速公路是《国家公路网规划》中内蒙古乌海至青海玛沁高速公路的简称（编号：G1816），途经银川和中卫，是宁夏自治区“三环四纵六横”高速公路网规划的最西纵线。乌玛高速公路的建成将极大缓解宁夏自治区南北向运输通道压力，缩短银川至兰州的行车时间。乌玛高速公路的建成通车不仅有助于西北城市群的建设，对推进丝绸之路经济带和完善国家高速公路网也具有重要意义。

乌玛高速公路采用双向四车道标准建设，设计速度100 $km\cdot h^{-1}$，由于线路穿越腾格里沙漠东南缘，境内流动沙丘对乌玛高速公路建设和安全运营带来极大挑战[1]。近年来，有不少学者对腾格里沙漠东南缘沙丘形成演化、风沙输移、防护措施和防护效益等做了详细研究[2-9]，为乌玛高速公路的建设和风沙防护奠定了良好基础。但由于乌玛高速公路选线与包兰铁路沙坡头段存在差异，加之线路两侧风沙地貌复杂多变，使得上述研究成果难以直接应用于乌玛高速公路风沙防护体系设计之中。因此，亟需对线路所经区域风沙环境进行详细研究，研究结论不仅对乌玛高速公路沿线风沙防治设计具有重要指导意义，更可为包兰铁路沙坡头段风沙防护体系更新和完善提供有益借鉴。

1 研究区概况及野外观测

腾格里沙漠总面积3.67×10^4 km^2，是我国第四大沙漠，流动沙丘广布，类型包括格状沙丘、新月形沙丘和新月形沙丘链等。常年受蒙古高压影响，干旱少雨，风沙活动强烈，年均降雨量176.5 mm，年均蒸发量1500~2000 mm，年均气温9.2 ℃。境内天然植被有沙竹（*Phyllostachys propinqua*）、黑沙蒿（*Artemisia ordosica*）和沙蓬（*Agriophyllum squarrosum*）等[1]。乌玛高速公路腾格里沙漠段北起中卫迎水桥南至红卫，与定武高速（G2012）相接，穿越腾格里沙漠路段长约21 km。

本文采用野外定点观测和实地考察相结合方式获取数据。首先，沿乌玛高速公路架设两台全自动气象仪，用于监测公路沿线风速、风向、气温和空气湿

收稿日期：2020-05-19； **修订日期**：2020-11-19
基金项目：宁夏交通厅公路工程科研项目（WMKY1）和国家自然科学基金项目（41871016）资助
作者简介：张克存（1978-），男，研究员，主要从事风沙灾害与风沙工程研究. E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn

度。1号气象仪位于104°56′49.74″E,37°32′50.37″N,海拔1370 m;2号气象仪位于104°52′28.85″E,37°30′4.92″N,海拔1510 m,两者相距约8 km,均架设在流动沙丘顶部。风速风向传感器架设高度距地表2.0 m,数据采集时间步长5 min,数据采集起止时间为2017年2月至2018年2月。风沙流观测采用高20 cm阶梯式集沙仪,进口断面2 cm×2 cm。其次,公路沿线实地考察,自NE向SW依次设置5个监测样地,单个监测样地面积400 m×400 m,结合无人机和人工实地考察,分析线路两侧植被、沙丘类型和地表沉积物特征(图1)。

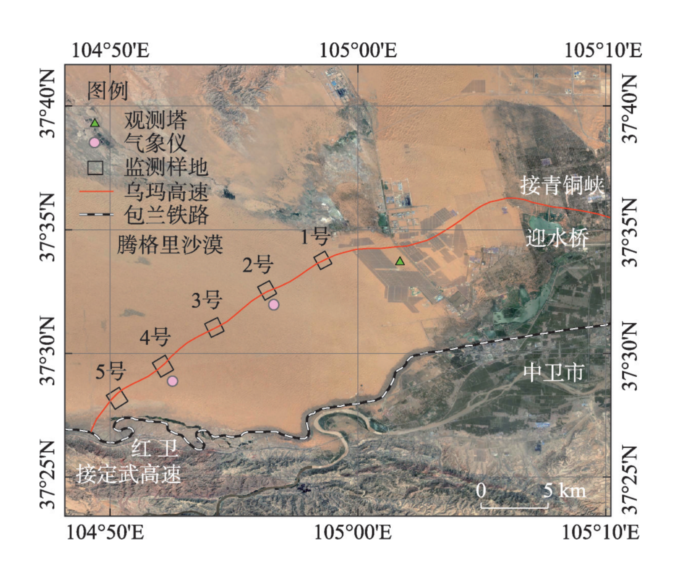


图1 乌玛高速公路中卫段线路分布

Fig. 1 Line layout of Zhongwei section along Wuhai-Maqin Highway

2 风沙环境特征

2.1 起沙风

起沙风是沙粒起动需要的最小风速,是评定区域风沙环境的重要指标,也是设计防护体系的重要依据。参考本区域已有研究成果,将距地表2 m高度处的沙粒起动风速定为5 m·s^{-1}[10]。利用乌玛高速公路周边气象资料,得知该区域年均风速2.86 m·s^{-1},大于起沙风的平均风速6.23 m·s^{-1}。观测期内起沙风频次占总频次的19.56%,以5~6 m·s^{-1}风速区间起沙风频率最大,达45.37%;6~7 m·s^{-1}风速区间起沙风频次占全部起沙风频次的28.35%;7~8 m·s^{-1}和8~9 m·s^{-1}风速区间频率分别为14.66%和7.98%;9 m·s^{-1}以上起沙风频率为3.64%,大于12 m·s^{-1}风速仅出现6次。公路沿线起沙风以5~9 m·s^{-1}风速区间为主,占全部起沙风频次的96.36%,且风速越大,频率越小。观测期内起沙风向以NW-NNW和E-ESE为主,其中,NW-NNW的风频率为26.15%,E-ESE的风频率为28.34%,大于12 m·s^{-1}的风速集中在NW-NNW(图2)。

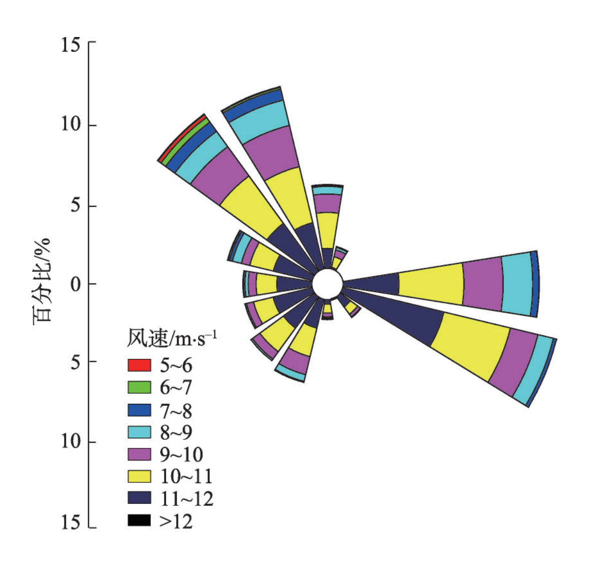


图2 乌玛高速公路中卫段起沙风玫瑰

Fig. 2 Sand-driving wind along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

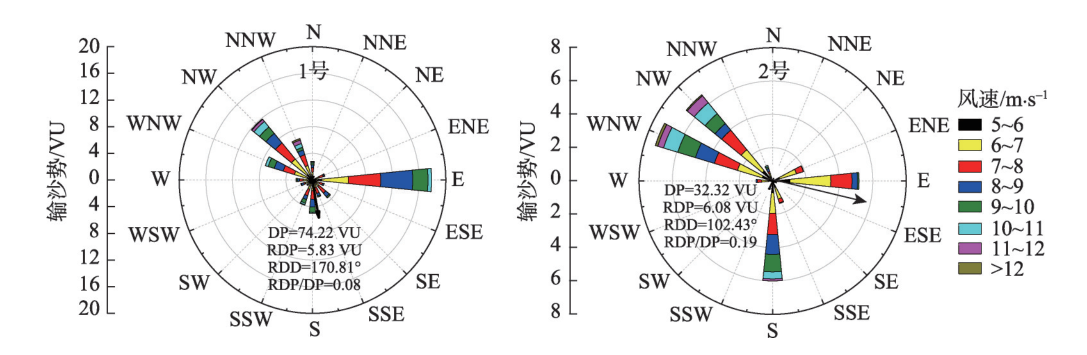
2.2 输沙势

输沙势是反映区域潜在输沙能力的重要指标参数,为矢量单位。依据Fryberger提出的输沙势方程计算,可得出各个时段内的输沙势大小[11],具体计算公式:

$$DP = V^2(V - V_t)t \quad (1)$$

式中:DP为输沙势(VU);V为风速(m·s^{-1});V_t为起沙风速(m·s^{-1});t为起沙风持续时间。

如图3所示,1号观测点全年输沙势(DP)74.22 VU,合成输沙势(RDP)5.83 VU,合成输沙方向(RDD)170.81°,方向变率(RDP/DP)0.08。2号观测点靠近包兰铁路沙坡头段,风沙活动较1号观测点弱,全年输沙势仅为32.32 VU,合成输沙势较1号观测点大,为6.08 VU,合成输沙方向102.43°,与1号点相差68.38°,方向变率0.19。主导输沙方向集中在NW、E和S方位,1号观测点在3个方位的输沙势分别为11.86 VU、17.88 VU和5.00 VU。2号观测点NW和E向输沙势分别减小至6.69 VU和5.18 VU,S向输沙势则增加至6.0 VU。



注：DP为全年输沙势；RDP为合成输沙势；RDD为合成输沙方向；RDP/DP为方向变率。

图3 乌玛高速公路中卫段输沙势

Fig. 3 Drift potential along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

2.3 最大可能输沙量

最大可能输沙量是在沙源充足、沙面平坦裸露的环境下，气流对沙物质搬运能力的理论极限值，被广泛应用在风沙防治工程的设计之中[12-14]，计算公式为：

$$Q=\sum 0.895\times\left(v-v_t\right)^{1.9}\times f\times t \qquad (2)$$

式中：Q为最大可能输沙量，一般用单位宽度的沙通量来表示（$m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$）；$v$为风速（$m\cdot s^{-1}$）；$v_t$为起沙风速（$m\cdot s^{-1}$）；$f$表示频次；$t$为数据采集间隔。经计算，1号观测点最大可能输沙量为1.66 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$，合成量0.13 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$，合成方向170.96°；2号观测点最大可能输沙量为0.7 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$，合成量0.16 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$，合成方向101.80°，与1号点合成方向相差为69.16°。1号观测点输沙量集中在WNW、NW、NNW和E方位，分别为0.17 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$、0.28 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$、0.15 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$和0.43 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$。2号观测点集中在WNW、NW、S和E方位，4个方位的输沙量分别为0.17 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$、0.15 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$、0.14 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$和0.10 $m^3\cdot m^{-1}\cdot a^{-1}$（图4）。

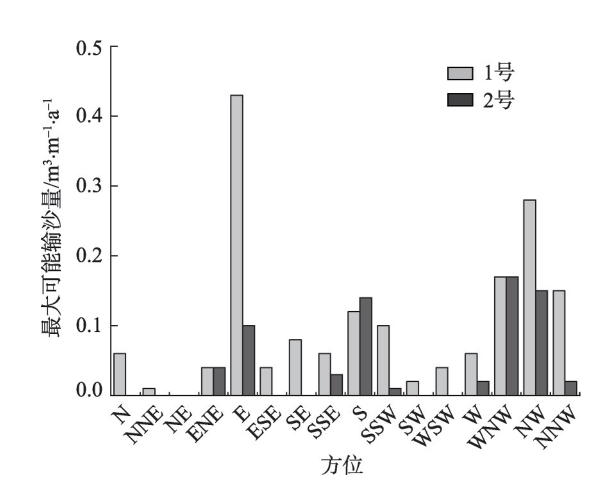


图4 乌玛高速公路中卫段最大可能输沙量

Fig. 4 Maximum possible sand-transporting quantity along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

2.4 风沙流结构

气流搬运的沙子在搬运层内随高度的分布称为风沙流结构，对工程防沙设计有重要意义[13]。本文利用梯度集沙仪对公路途径的流动沙丘和半固定沙丘进行观测。其中，半固定沙丘植被为人工种植，包括花棒、柠条等，流动沙丘全为原始沙丘。流动沙丘输沙率为26.44 $g\cdot cm^{-1}$，半固定沙丘输沙率为15.44 $g\cdot cm^{-1}$，即半固定沙丘表层植被可拦截近地表41.6%的沙粒（图5）。无论是流动沙丘还是半固定沙丘，近地表风沙流结构均符合负指数函数关系，且流动沙丘55.53%沙粒集中在近地表8 cm范围内，

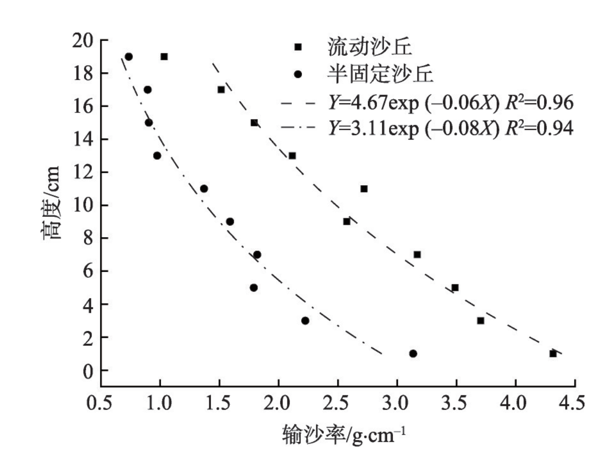


图5 乌玛高速公路中卫段典型区段风沙流结构

Fig 5 Sand flow structure along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

半固定沙丘0~8 cm高度层沙粒占比增加至58.1%。

2.5 沙丘类型与分布格局

沙丘是干旱气候条件下风力长时间作用于沙

质地表形成的,其形态和格局对于揭示区域风沙环境有着重要意义[15-20]。研究区以格状沙丘为主,主梁大体呈NNE-SSW走向,但不同样地内沙丘规模和形态存在差异(图6,表1)。1号样地以横向沙垄为主,走向集中在NE 30°~62°范围内,相对高度2.0~4.0 m。样地东北侧受太阳能光伏园区影响,NE向起沙风频次明显偏少,导致E向副梁发育不明显,部分沙丘高度仅为1.0 m。沙丘平均间距自NE向SW呈递减趋势,沙丘间距最大120.1 m,最小间距29.8 m,平均间距105.2 m。2号样地内沙丘类型以格状沙丘为主,沙丘主梁走向集中在NE 40°~45°范围内,偏转幅度较1号样地小,相对高度2.5~4.3 m,平均间距59.8 m;副梁相对高度1.8~2.5 m,平均间距35.2 m。3号样地和4号样地内格状沙丘占监测样地80%以上。其中,3号样地格状沙丘主梁走向集中在NE 45°~63°范围内,相对高度3.1~4.5 m,平均间距60.6 m;副梁相对高度2.1~2.9 m,平均间距44.2 m。4号样地内格状沙丘的主梁走向集中在北偏东55°~64°范围内,相对高度3.2~4.6 m,平均间距75.4 m;副梁相对高度2.2~3.1 m,平均间距53.4 m。5号样地位于包兰铁路防护体系内,植被覆盖率最高,植物以人工种植的籽蒿、沙米、雾冰藜、虫实、花棒为主,区域内采用半隐蔽草方格沙障固定,表层已形成生物结皮,后期沙丘活化概率较低,不易发生较大规模的沙丘移动和风沙活动。

除5号样地大规模使用固沙措施外,其余4个样地沙丘均为流动沙丘,除少量金字塔沙丘和沙垄外,研究区内沙丘类型以格状沙丘为主。依据上述区域沙丘类型与分布格局,本文据此将高速公路穿沙路段划分为3个区段,一是在高速公路与包兰铁路交叉点开始计算,长度7.0 km,沙丘以固定和半固定为主,固沙措施包括麦草方格和人工植被,风沙

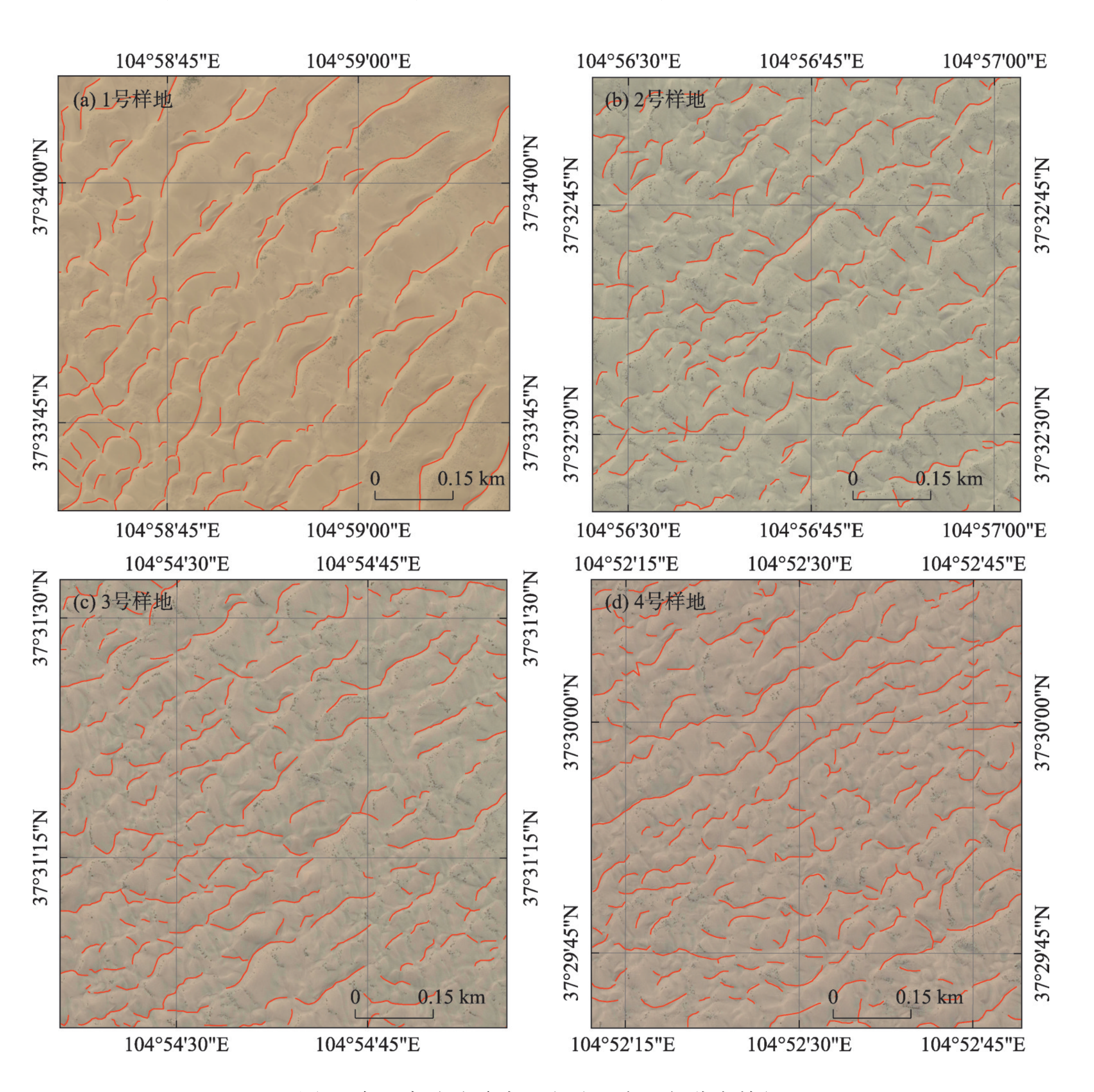


图6 乌玛高速公路中卫段沙丘类型与分布特征

Fig. 6 Dune type and distribution along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

活动最弱；二是流动沙丘区段，长约10 km，均为流动沙丘，以格状沙丘为主，风沙活动最强烈；三是光伏工程措施影响下的区段，长约3.0 km，位于高速公路穿沙路段东北区域，沙丘类型以线性沙垄为主，风沙活动强度介于前两者之间。

2.6 地表沉积物粒度特征

沉积物粒度特征是研究沙漠风沙和沉积环境极其重要的指标之一，与局地风力条件、沉积环境、地形和植被等因素关系密切[21]。本文样品均为近地表2.0 cm范围内，粒度测试使用Malvern Matersizer 2000激光粒度仪完成。根据累计曲线及Folk and Ward提出的计算公式[22]，图解计算样品的平均粒径、分选系数、偏度和峰度[23]。乌玛高速公路两侧地表沉积物以中沙和细沙为主，粗沙和极细沙含量较少。其中，1号、3号和4号样地中沙百分比含量最大，分别为73.44%、62.75%和79.63%，2号和5号样地细沙百分比含量最大，分别为55.31%和49.57%。1号样地表层沙粒平均粒径最大，为0.34 mm，表明区域风沙活动较为强烈，5号样地由于靠近铁路防护体系，植被覆盖高，土壤结皮发育良好，与其余样地相比，风沙活动最弱，平均粒径仅为0.21 mm。公路沿线表层沙粒分选系数集中在0.40~0.70之间，分选性较好。沙粒偏度范围集中在0.22~0.43，属于正偏和极正偏，峰度为中等和宽峰态（表2）。

3 公路风沙灾害类型及防治方案

通过对乌玛高速公路中卫段沿线风沙灾害考察与研究，发现本路段风沙灾害主要表现为2种方式：一是半固定和固定沙丘活化形成新的沙源，在风力作用下呈过境风沙流形式威胁公路安全；二是沙丘在风力作用下整体前移，尤其是格状沙丘主梁的移动，导致路面沙埋。前者风沙危害形式主要位于4号样地和5号样地附近，前期本区域内大规模使用半隐蔽式固沙措施和人工种植植被，随着时间的延长，秸秆逐渐腐烂，半隐蔽式固沙措施逐渐失效，但表层生物结皮并未形成。在风力作用下，部分沙丘丘顶被风蚀，形成活化斑块。沙丘整体前移的危害方式主要在其余样地附近，因其周边均为流动沙丘，虽整体的沙丘类型稳定，但沙丘在风力作

表1 不同高度沙丘统计

Tab. 1 Dune height of different monitoring area /m

沙丘数量及比例	沙丘高度 0~2 m	2~4 m	4~6 m	5~8 m	>8 m	总数/个	平均高度/m	最高高度/m
数量/个	38	33	37	31	4	143	3.67	9.67
占比/%	26.57	23.08	25.87	21.68	2.80	–	–	–
数量/个	27	63	52	60	9	211	4.32	10.70
占比/%	12.80	29.86	24.64	28.44	4.27	–	–	–
数量/个	38	71	54	47	5	215	3.79	9.12
占比/%	17.67	33.02	25.12	21.86	2.33	–	–	–
数量/个	35	90	86	59	7	277	4.23	10.25
占比/%	12.64	32.49	31.05	21.30	2.53	–	–	–

表2 乌玛高速公路中卫段沿线地表沉积物粒度特征

Tab. 2 Granularity characteristics of sand grains along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

样地	极细沙/%	细沙/%	中沙/%	粗沙/%	粒度参数			
	0.063~0.125 mm	0.125~0.250 mm	0.250~0.500 mm	0.500~1.000 mm	平均粒径/mm	分选系数	偏度	峰度
1号	0.75	18.06	73.44	7.75	0.34	0.58	0.32	0.85
2号	7.15	55.31	37.54	0.00	0.22	0.40	0.43	1.01
3号	3.69	30.29	62.75	3.27	0.27	0.70	0.22	0.78
4号	0.60	19.77	79.63	0.00	0.29	0.42	0.41	0.97
5号	10.98	49.57	39.45	0.00	0.21	0.57	0.29	0.82

用下仍发生移动,造成风沙危害(图7)。

鉴于此,结合已有铁路和公路机械措施和生物措施相结合的风沙防治经验[24-25],提出集“阻沙、固沙、防风、景观、生态、防火”功能于一体的“六带一体”的防护体系(图8)。公路迎风侧防护体系设置宽度200 m,包括高立式阻沙栅栏、高立式大网格沙



图7 乌玛高速公路中卫段风沙灾害类型

Fig. 7 Sand disasters along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

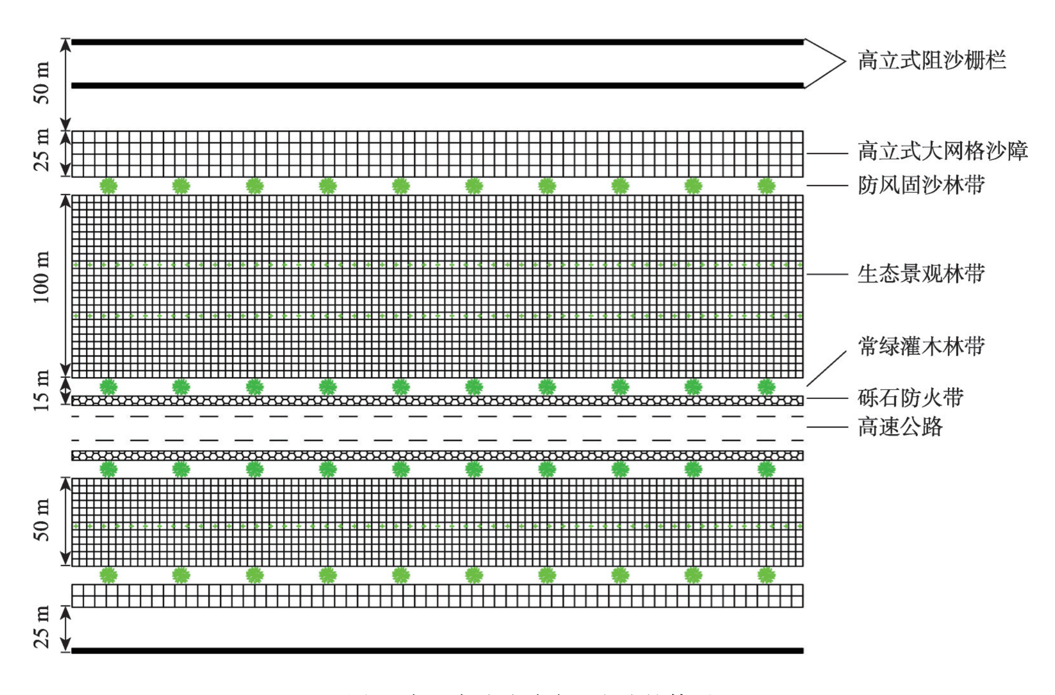


图8 乌玛高速公路中卫段防护体系

Fig. 8 Sand control system along Zhongwei section of Wuhai-Maqin Highway

障、防风固沙林带、生态景观林带、常绿灌木林带和砾石防火带，宽度依次为50 m、25 m、10 m、100 m和15 m。背风侧防护体系设置宽度112 m，各带功能与迎风侧相同，但考虑到东南风偏少，宽度分别为25 m、12 m、10 m、50 m和15 m。其中，高立式阻沙栅栏高2 m，迎风侧设置2道，背风侧设置1道；高立式大网格沙障高1.5 m，规格6 m×6 m，迎风侧4组，背风侧2组；防风固沙林带由适合于本区域植被组成，采用滴灌方式；生态景观林带为半隐蔽式方格，规格1 m×1 m，内部间植红柳、沙拐枣等，采用滴灌方式。

4 结 论

在我国西北广袤的沙区修建高速公路，风沙危害防治势必是第一要务，风沙防治措施的成败与公路安全运营息息相关。乌玛高速公路是宁夏回族自治区沿黄经济带重要南北向运输大通道，其建成与通车将对西北城市群的形成和区域经济发展有着重要意义。而线路途径腾格里沙漠路段的风沙环境、沙丘类型与分布格局对公路安全运营起到决定性作用。通过野外观测与实地调查，对路线所经区域的风能环境、沙丘类型与分布规律、表层沉积物特征进行分析与研究。风向以NW-NNW组风向和E-ESE组风向为主。从不同方位起沙风、输沙势或是最大可能输沙量分布来看，NW、E和SE为主导方向。线路两侧沙丘类型以格状沙丘为主，沙丘主梁呈NNE-SSW走向，副梁与主梁基本垂直，自NE向SW，沙丘高度呈增加趋势。由于区域内流动沙丘广布，沙源充足，乌玛高速公路走向为NE，与区域内的主风向NW垂直。受局地地形影响，不同路段风沙灾害的程度和方式会存在一定差异。考虑到乌玛高速公路东侧紧邻沙坡头国家自然保护区，近年随着国家生态环境保护工程的深入实施，保护区内风沙活动呈减弱趋势。线路两侧虽然存在偏东风，但与西北风带来的风沙危害相比，偏东风带来的威胁相对较小，因而在乌玛高速公路风沙防护体系设计上，应重点防治西北风带来的风沙危害。依据上述研究成果，提出"六带一体"的综合防护体系，包括高立式阻沙栅栏、高立式大网格沙障、防风固沙林带、生态景观林带、常绿灌木林带和砾石防火带，确保乌玛高速公路的安全运营。

参考文献(References)

[1] 文青. 腾格里沙漠风沙地貌特征的空间变化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. [Wen Qing. Spatial changes of aeolian geomorphology in the Tengger Desert[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]

[2] 哈斯, 董光荣, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态-动力学研究[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 466−471. [Ha Si, Dong Guangrong, Wang Guiyong. Research on morphodynamics of network dune in the southeastern Tengger Desert[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(5): 466−471.]

[3] 强明瑞, 李森, 金明, 等. 60ka来腾格里沙漠东南缘风成沉积与沙漠演化[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 256−259. [Qiang Mingrui, Li Sen, Jin Ming, et al. Aeolian deposits on the southeastern margin of Tengger Desert and desert evolution during the last 60000 years[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(3): 256−259.]

[4] 张加琼, 张春来, 吴晓旭, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系内的风沙沉降规律[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 16−22. [Zhang Jiaqiong, Zhang Chunlai, Wu Xiaoxu, et al. Aeolian deposition in protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 16−22.]

[5] 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529−533. [Qu Jianjun, Ling Yuquan, Jing Zhefan, et al. Interaction between sand blown activity and protection system in Shapotou section of Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27 (4): 529−533.]

[6] 张春来, 邹学勇, 程宏, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(3): 353−360. [Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Cheng Hong, et al. Near surface air flow field across the shelterbelt of Shapotou section Baotou-Lanzhou Line[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(3): 353−360.]

[7] 安志山, 张克存, 屈建军, 等. 平坦沙质地表蚀积量计算模型研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 210−214. [An Zhishan, Zhang Kecun, Qu Jianjun, et al. Computational model of aeolian sand erosion and deposition quantity on flat sandy surface[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 210−214.]

[8] 安志山, 张克存, 谭立海, 等. 不同高度阻沙栅栏的防沙效益野外观测[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 37−41. [An Zhishan, Zhang Kecun, Tan Lihai, et al. Process of aeolian sand erosion and depositon and sand controlling effect fences with different height [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 37−41.]

[9] 康文岩, 王立, 屈建军, 等. 包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 94−99. [Kang Wenyan, Wang Li, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel simulation experiment on the protective effect of different structures of sand-blocking fence in Shapotou section of Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 94−99.]

[10] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 等. 沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 550-555. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Zhao Aiguo, et al. Features of sand drift movement in desert: A case study at sand drift observation station of Chinese Academy of Sciences[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(4): 550-555.]

[11] Fryberger S G. Dune form and wind regime[C]//Mckee E D. A study of global sand seas. US Geological Survey Professional Paper, 1979, 1052: 137-169.

[12] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 362-368. [Ling Yuquan. Engineering calculation of maximum possible sand transporting quantity[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(4): 362-368.]

[13] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 腾格里沙漠东南缘风沙活动动力条件分析——以沙坡头地区为例[J]. 干旱区地理, 2008, 31(5): 643-649. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Dynamical characteristics of wind-blown sand activities at the southeast edge of Tengger Desert: A case study at Shapotou Region[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(5): 643-649.]

[14] 张克存, 俎瑞平, 屈建军, 等. 腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 605-610. [Zhang Kecun, Zu Ruiping, Qu Jianjun, et al. Relationship between sand drift potential and maximum possible sand transport in southeast of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4): 605-610.]

[15] 王训明, 董治宝. 起沙风统计和工程输沙量计算中的若干问题[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3): 41-45. [Wang Xunming, Dong Zhibao. Some problems on statistical data of blown sand winds and calculation for volume of sand transport[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(3): 41-45.]

[16] Lyu P, Clement N, Dong Z B, et al. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment[J]. Nature Geoscience, 2015, 7(2): 31, doi: 10.1038/nge02047.

[17] 张正偲, 董治宝. 腾格里沙漠东南缘春季降尘量和粒度特征[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1789-1794. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Characteristics of dust deposition and particle size in spring in the southeastern Tengger Desert[J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1789-1794.]

[18] Blott S J, Pye K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2001, 26(11): 1237-1248.

[19] 屈建军, 凌裕泉, 刘宝军, 等. 我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 225-231. [Qu Jianjun, Ling Yuquan, Liu Baojun, et al. The research status and development trends of wind-sand engineering in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 225-231.]

[20] 张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 573-583. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Yu Yanping, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 573-583.]

[21] 王陇, 高广磊, 张英, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1003-1010. [Wang Long, Gao Guanglei, Zhang Ying, et al. Particlesize distribution of aeolian soils in the Mu Us Sandy Land and the influence factors[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1003-1010.]

[22] 潘美慧, 薛雯轩, 伍永秋, 等. 西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 111-119. [Pan Meihui, Xue Wenxuan, Wu Yongqiu, et al. Grain size characteristics of the climbing dunes in Dinggye area of Tibet[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 111-119.]

[23] 王艺钊, 原伟杰, 丁国栋, 等. 聚乳酸(PLA)沙障凹曲面及沉积物粒度特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 671-678. [Wang Yizhao, Yuan Weijie, Ding Guodong, et al. Concave surface features and grain-size characteristics in polylactic acid sand barrier[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 671-678.]

[24] Wang Tao, Qu Jianjun, Ling Yuquan, et al. Wind tunnel test on the effect of metal net fences on sand flux in a Gobi Desert, China [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(6): 888-899.

[25] 于宝勒, 吴文俊, 赵学军, 等. 内蒙古京津风沙源治理工程土壤风蚀控制效益研究[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1278-1286. [Yu Baole, Wu Wenjun, Zhao Xuejun, et al. Benefits of soil wind erosion control of the Beijing-Tianjin sand source control project in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1278-1286.]

Aeolian sand environments and disaster prevention along Zhongwei section of the Wuhai-Maqin Highway

ZHANG Kecun[1], AN Zhishan[1], HE Mingzhu[1], ZHANG Lingyun[2], WANG Jinguo[3], HOU Yonggang[4]

(1. Dunhuang Gobi and Desert Ecology and Environment Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Transportation Department of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China; 3. Ningxia Investment Engineering Construction Management Co., Ltd., Yinchuan 750000, Ningxia, China; 4. Ningxia Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: The Wuhai-Maqin Highway is of great significance to the formation of urban agglomerations and regional economic development in northwest China. To prevent the highway from being threatened by wind-sand hazards, field observations and investigations of aeolian environments, dune types and their distribution rules, and the characteristics of the surface sediment along the Wuhai-Maqin Highway were conducted. During the observational period, the results show that the average annual wind speed was 2.86 $m \cdot s^{-1}$. The annual value of the sand-drifting wind was 6.23 $m \cdot s^{-1}$. The major directions were NW-NNW and E-ESE. From northeast to southwest, the sand transport potential and maximum possible sand transport show a decreasing trend but still belong to low wind energy environments. All the dunes in the plots were mobile dunes, except in plot 5, where the dunes were fixed. The type of dunes was primarily grid dunes. Under the action of wind, the main beams of the grid dunes primarily extend NE-SW. Moreover, from the northeast to the southwest, the height of the typical dunes increase as a result of the altitude and local environment. The grain sizes of the surface sediments of the dunes in the study area correspond primarily to medium and fine sands, with good sorting properties. The skewness is positive or extremely positive, and the kurtosis is medium and broad. Based on the above results, a comprehensive protection system of “six belts in one” is proposed to ensure the safe operation of the Wuhai-Maqin Highway.

Key words: sand-drifting wind; drift potential; grid dunes; Wuhai-Maqin Highway